

Cesta ke spinovému tranzistoru

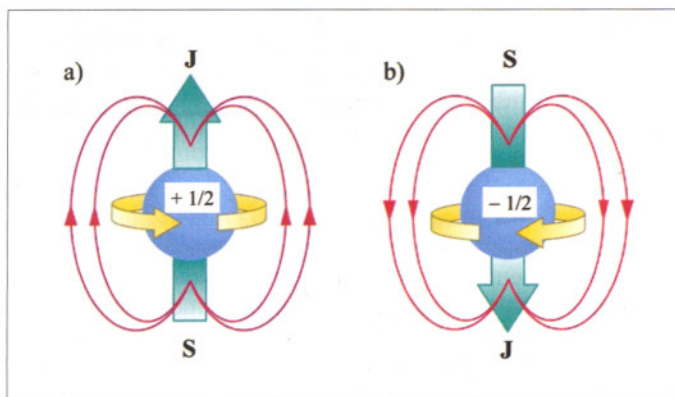
Petr Němec, Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze

Spintronika je nové odvětví elektroniky, kde se ke zpracování a uchování dat používá kromě náboje elektronu také jeho spin. V současné době již existují komerčně dostupné spintronicke součástky pro ukládání dat, ale využití spinu pro zpracování informací je zatím teprve v počátcích. V tomto článku je stručně vysvětleno, co to vlastně spin elektronu je. Dále je zde ukázáno, jakým způsobem je možné dosáhnout toho, že se orientace spinu elektronu projeví v měřitelných elektrických vlastnostech elektronických součástek. Je zde vysvětlena základní fyzikální podstata prvního návrhu spinového tranzistoru z roku 1990 i dvě jeho různé praktické realizace, ke kterým došlo v letech 2009 a 2010.

Srdcem každého počítače je procesor (anglicky Central Processing Unit, CPU), ve kterém dochází ke zpracování informací, a tím i k vykonávání pokynů zadaných uživatelem. Rychlost procesoru tedy přímo určuje, jak dlouho je nutné čekat na výsledky příslušných výpočtů. Ve skutečnosti je to poněkud složitější, protože do hry vstupují ještě rychlosti ukládání informací v operační paměti nebo na pevném disku počítače, ale i tak je pro uživatele opravdu výhodné mít počítač

s rychlým procesorem. Co ale určuje „rychlost“ procesoru? Množství výpočtů vykonaných za jednotku času je dáno součinem frekvence procesoru a počtem instrukcí vykonaných v jednom hodinovém cyklu. Frekvence běžně prodávaných procesorů, které jsou zhotovovány z křemíku, se ale kvůli problémům spojenými s odvodem tepla z nich již několik posledních let vůbec nezvyšuje. Nárůstu výkonu procesorů se tedy v současné době dosahuje pouze zvětšením počtu instrukcí vykonaných v hodinovém cyklu, který přibližně souvisí s odmocninou počtu tranzistorů v procesoru integrovaných. Zajímavé je, že již od obje-

vení integrovaného obvodu v roce 1958 platí empirické pravidlo, že počet tranzistorů umístěných v integrovaném obvodu se



Obr. 1 Schematické znázornění spinu elektronu jako malého magnetu umístěného do osy otáčení kuličky (červené křivky znázorňují magnetické siločáry)

přibližně zdvojnásobí každé dva roky – toto pravidlo bývá označováno jako Mooreův zákon podle spoluzakladatele společnosti Intel G. E. Moore, který jej publikoval v roce 1965 [1]. Otázkou ale je, jak dlouho tento nárůst výkonu procesoru díky zvyšující se miniaturizaci může ještě pokračovat. V současnosti jsou prodávány procesory, kde je velikost nejmenších strukturních detailů 32 nm. Při zmenšení jejich velikosti pod jistou mez, která je přibližně 10 nm, však přestanou platit zákony klasické fyziky, které tvoří základ fungování dnešních integrovaných obvodů. V těchto miniaturních rozměrech totiž místo toho začnou platit

zákony fyziky kvantové. Jedním z důsledků je, že elektron si zde již není možné představit jako „nabitou kuličku“, protože se zásadním způsobem začne projevovat jeho vlnový charakter. Pokud by se například elektron začal šířit vodivým kanálem o šířce několika nanometrů a ve srovnatelné vzdálenosti by byl nějaký jiný vodivý kanál, elektron se s jistou pravděpodobností bude vyskytovat v obou těchto kanálech a tato jeho pravděpodobnost výskytu navíc může v čase oscilovat. Tento jednoduchý příklad jasně ukazuje, že za pár let již nebude možné dále zmenšovat rozměry jednotlivých součástek v integrovaných obvodech bez toho, že se zcela změní základní fyzikální principy, které jsou při jejich fungování využívány. Otázkou je, jak si s hrozící stagnací elektronika v budoucnosti poradí.

Jedním z možných dalších směrů vývoje elektroniky je začít využívat spin elektronu. To, že elektron má kromě náboje i spin, je známo již od roku 1925, ale v běžné elektronice byl spin až do nedávné doby naprosto opomíjen. Co to vlastně spin je? Spin je vlastní úhlový moment hybnosti, který se projevuje vlastním magnetickým momentem elektronu. Spin je svou podstatou kvantová veličina, a proto v klasické elektrodynamice nemá obdobu. Velice zjednodušeně je ale možné si elektron představit jako malou otáčející se kuličku, která má miniaturní tyčový magnet umístěný v ose rotace této kuličky – viz obr. 1. Orientace magnetku (spinu) je dána smyslem otáčení kuličky a znázorňuje se pomocí šipky. Elektron se spinem $+1/2$ na obr. 1a) odpovídá kuličce rotující „od západu k východu“ a indukuje stejné magnetické pole jako miniaturní tyčový magnet s jižním pólem (J) směřujícím nahoru. Elektron se spinem $-1/2$ na obr. 1b) odpovídá kuličce rotující „od východu na západ“ a odpovídá magnetu se severním pólem (S) směřujícím nahoru. V běžném elektrickém obvodu je orientace spinu zcela náhodná a nemá žádný vliv na pohyb elektronu. V magnetickém poli ale mají elektrony se spinem ve směru magnetického pole jinou energii než elektrony se spinem opačným. Pokud tedy běžný – spinově nepolarizovaný – elektrický proud prochází feromagnetickým kovem, kde jsou vždy všechny magnetické momenty orientované jedním směrem, elektrony po-

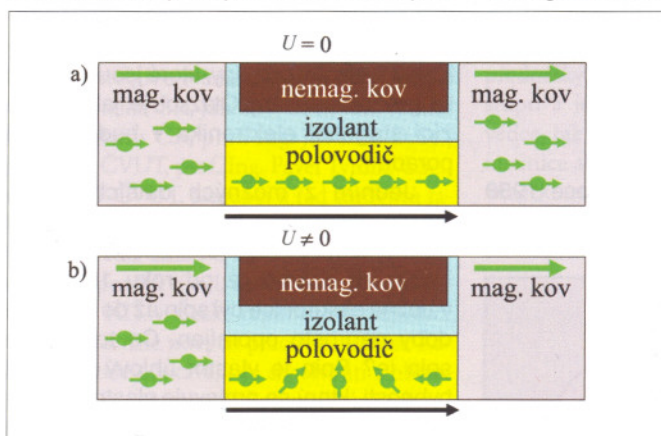
stupně otáčí svůj spin do směru, který odpovídá menší energii (tj. například ve směru magnetizace v tomto feromagnetu). Na výstupu z feromagnetu je pak tedy elektrický proud spinově polarizovaný, tj. pro všechny elektrony míří jejich spin jedním směrem. Pokud další pohyb elektronů probíhá v nemagnetické látce, spiny elektronů za nějakou dobu opět začnou mířit náhodnými směry a na průchodu proudů se jejich dočasná spinová polarizace nijak neprojeví. Zcela jiná situace ale nastane, pokud spinově polarizované elektrony začnou opět procházet magnetickou látkou. Pokud je orientace jejich spinu souhlasná se směrem magnetizace v tomto druhém materiálu, elektrony budou procházet bez problémů a elektrický odpor bude malý. Pokud naopak budou spiny elektronů mířit do opačného směru, elektrický odpor bude veliký. Tento jev, který byl poprvé experimentálně pozorovaný v roce 1988, se nazývá gigantická magnetorezistence (Giant Magnetoresistance, GMR), protože relativní změna odporu podle orientace spinu

i po odpojení napájení. Její nevýhodou ale naopak je, že se zatím nedaří vyrábět příslušné paměťové moduly s kapacitou přesahující desítky Mb.

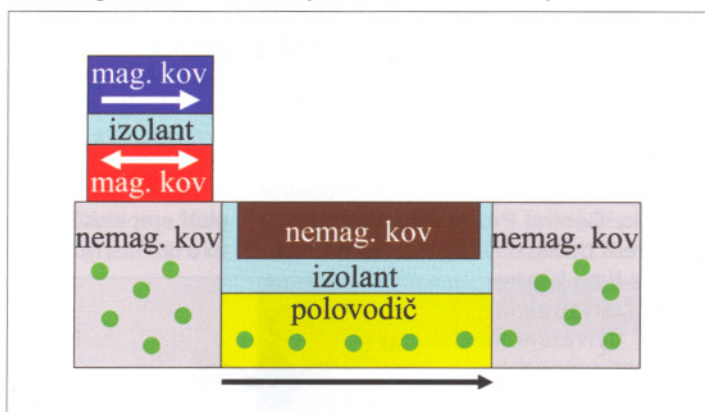
Zatímco používání spinu elektronu v pevných discích a pamětech počítačů je v současné době již realitou, na jeho komerční využití v procesorech se stále ještě čeká. Přitom první návrh na tranzistor založený na spinu elektronu – tzv. spinový tranzistor, pochází již z roku 1990 [3]. V tomto návrhu se jedná vlastně o běžný plem řízený tranzistor (Field Effect Transistor, FET), ve kterém je vodivost v polovodičovém kanálu mezi dvěma elektrodami ovládána elektrickým polem přiloženým na hradlo (Gate). Rozdíl ale spočívá v tom, že zdrojová (Source) a odvodová (Drain) elektroda jsou tvořeny feromagnetickým kovem, a tedy je příslušný proud elektronů ve vodivém kanálu spinově polarizovaný – viz obr. 2. Spinově polarizované elektrony (na obr. 2 kuličky s šipkami) jsou injektovány ze zdrojové elektrody, která je vyrobena z feromagnetického kovu s magnetizací ve

z nich spočívá v tom, že by měl být velice jednoduše rekonfigurovatelný – pokud totiž dojde k otočení směru magnetizace v odvodové elektrodě, dojde při konstantním napětí na hradle k prohození otevřeného a uzavřeného stavu tranzistoru. Jeho hlavní potenciační výhoda ale spočívá v tom, že otočení spinu elektronu by mělo být podstatně rychlejší a také daleko méně energeticky náročné než napětím na hradle vyvolaná změna odporu polovodičového kanálu, která se v současné době v tranzistorech typu FET používá a která je způsobena např. odsátím vodivostních elektronů z kanálu. Zejména energetická úspornost takového tranzistoru je velice lákavá, protože množství elektrické energie spotřebované v souvislosti s používáním počítačů je v současnosti opravdu obrovské – před pár lety již například přesáhlo množství energie spotřebované v letecké dopravě.

Praktická realizace tohoto návrhu spinového tranzistoru však narazila na problém, že vzhledem k velice odlišným elektrickým vodivostem kovů a polovodičů není



Obr. 2 Schematické znázornění spinového plem řízeného tranzistoru (tento typ tranzistoru byl experimentálně realizován v roce 2009)



Obr. 3 Schematické znázornění pseudo-spinového plem řízeného tranzistoru (tento typ tranzistoru je poměrně jednoduše realizovatelný, protože pouze kombinuje technologii CMOS s technologií MTJ vyvinutou pro paměti typu MRAM)

může dosahovat až stovky procent. V roce 1997 firma IBM uvedla na trh čtecí hlavy v pevných discích počítačů založené na GMR a v roce 2007 byla za tento objev udělena Nobelova cena za fyziku. A bez nadsázky je možno říci, že právě tento jev založil spintroniku, neboli elektroniku využívající spinově polarizované nosiče náboje [2]. V roce 2007 byla firmou Freescale Semiconductor uvedena na trh další spintronická součástka – počítačová operační paměť typu MRAM. Tato paměť je založena na použití magnetického tunelovacího přechodu (Magnetic Tunnel Junction, MTJ), kde se projevuje spintronický jev obdobný GMR. Zatímco v případě GMR jsou dva feromagnetické kovy spojeny nemagnetickým kovem, v MTJ je od sebe odděluje tenká vrstva elektrického izolantu, skrz kterou musí elektrony tunelovat [2]. Výhoda paměti MRAM je, že je stejně rychlá jako běžně používaná paměť typu DRAM, ale informace v ní uložené se uchovávají

směru horizontální zelené šipky, do polovodičového kanálu, kde se šíří ve směru černé horizontální šipky. Množství elektronů prošlých do odvodové elektrody, která má magnetizaci souhlasně orientovanou s elektrodou zdrojovou, závisí na spinovém stavu elektronu v kanálu. Bez napětí na hradle se orientace spinu elektronu při šíření polovodičovým kanálem nemění – viz obr. 2a), a tedy elektrony mohou snadno přecházet z polovodiče do odvodové elektrody se souhlasně orientovanou magnetizací, což se projeví malým elektrickým odporem. Pokud naopak dojde k přiložení napětí na hradlo, pásová struktura v polovodiči se změní. To se vlivem relativistické spin-orbitální interakce projeví jako vnitřní efektivní magnetické pole, které otočí orientaci spinu elektronů – viz obr. 2b), díky čemuž elektrony nebudou moci přecházet z polovodiče do odvodové elektrody. Ve srovnání s běžnými tranzistory FET by tento spinový FET měl mít dvě podstatné výhody. První

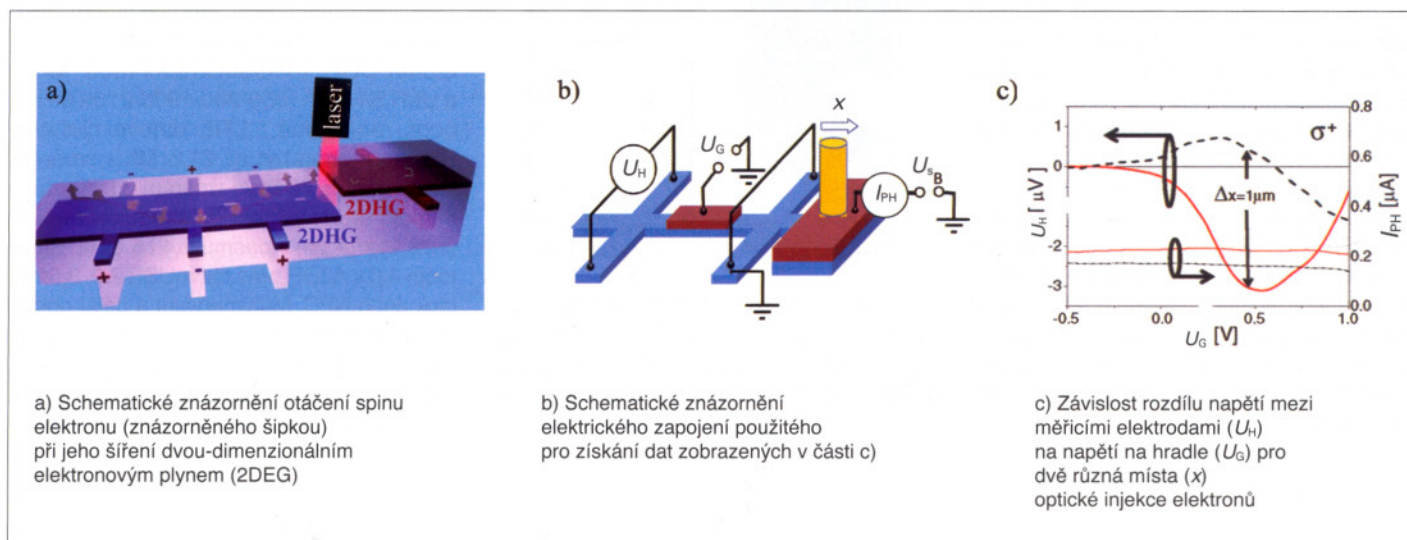
možné pomocí ohmického kontaktu dosáhnout účinnou injekci spinově polarizovaných elektronů z feromagnetického kovu do polovodiče. To se ale v nedávné době podařilo odstranit vložením dodatečné mezivrstvy, která elektricky odděluje feromagnetický kov od polovodiče a skrz kterou musí elektrony tunelovat při cestě z elektrody do vodivostního kanálu. Díky tomu se nakonec v roce 2009 týmu vědců z Koreje a USA podařilo funkční prototyp spinového tranzistoru realizovat [4]. Jako materiál pro feromagnetické elektrody byla použita slitina $Ni_{81}Fe_{19}$, vodivostní kanál byl zhotoven z polovodiče InAs a měření bylo provedeno při teplotě 1,8 K pomocí balistického transportu elektronů. Tento experiment sice prokázal principiální možnost realizace příslušného konceptu spinového tranzistoru, ale zatím se nezdá, že by bylo možné z tohoto směru výzkumu očekávat v blízké budoucnosti nějakou komerčně uplatnitelnou součástku (a to zejména z důvodu velice

nízkých teplot nezbytných pro dosažení jeho funkčnosti).

Jiným směrem se vydala vědecká skupina z Tokijské univerzity, kde se zaměřují na výrobu tzv. pseudo-spinového tranzistoru [5] – viz obr. 3. Termínu „pseudo“ je

Tento výzkum byl soustředěn kolem firmy Hitachi, konkrétně její výzkumné pobočky v Cambridge, a také se ho částečně zúčastnil tým vědců z Matematicko-fyzikální fakulty [6]. Aktivní částí tohoto tranzistoru je dvou-dimenzionální elektronový plyn (Two-

elektronu, a tím i výsledný vliv hradlového napětí na rozdíl napětí měřených na detekčních elektrodách – viz obr. 4c). Velikou výhodou této realizace spinového tranzistoru je, že elektrony se v polovodičovém kanálu pohybují difuzně (nikoliv balisticky), a tento



Obr. 4 Spinový tranzistor založený na spinovém Hallově jevu – SHE (tento typ tranzistoru byl experimentálně realizován v roce 2010)

zde použito proto, že zatímco ve spinovém tranzistoru je zpracování informace prováděno pomocí spinové polarizovaného proudu elektronů, v pseudo-spinovém tranzistoru je použit normální FET (s nemagnetickými elektrodami a nepolarizovanými elektrony znázorněnými na obr. 3 kuličkami bez šipek). K nemagnetické zdrojové elektrodě je ale navíc připojen magnetický tunelovací přechod (MTJ), který se skládá ze dvou vrstev feromagnetických kovů oddělených tenkou vrstvou elektrického izolantu a který doplňuje funkčnost tranzistoru i o paměťové funkce. Orientace magnetizace v horní (modré) vrstvě je pevná a v dolní (červené) je proměnná. V závislosti na relativní orientaci těchto dvou magnetizací je tunelovací proud velký (pro souhlasně orientované magnetizace), anebo malý (pro opačně orientované magnetizace), čehož je využíváno pro realizaci „nezapomínající“ paměti pro příslušný tranzistor. Velikou výhodou tohoto přístupu je, že je založen na kombinaci technologie CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor), která je v současnosti používána při výrobě většiny integrovaných obvodů, a technologie vyvinuté pro výrobu paměti MRAM. Nevýhodou tohoto přístupu však je, že zatím není technologicky možné umístit MTJ na každý tranzistor FET. Nicméně i integrované obvody, kde bude „nezapomínající“ paměťový prvek přítomen jen na části tranzistorů, mohou nalézt v budoucnosti své aplikace.

Úplně jiná cesta vedla k vývoji spinového tranzistoru založeného na spinovém Hallově jevu (Spin Hall Effect, SHE), jehož prototyp byl realizován v roce 2010 jako druhý funkční spinový tranzistor na světě [6].

-Dimensional Electron Gas, 2DEG) v heteropřechodu AlGaAs/GaAs. V tomto materiálu byl pomocí elektronové litografie vymezen polovodičový kanál a elektrické kontakty, mezi kterými se měří elektrické napětí – viz obr. 4. Spinově polarizované elektrony nebyly v tomto konkrétním případě do tranzistoru injektovány elektricky, ale opticky – absorpcí kruhově polarizovaného světla z laseru v příčném přechodu p-n mezi 2DEG a 2DHG (dvou-dimenzionálním děrovým plynem) [6], nicméně obdobných výsledků bylo následně dosaženo i v případě elektrické injekce elektronů z feromagnetického kovu. Vlivem relativistické spin-orbitální interakce mění spin elektronu při šíření tímto polovodičovým kanálem svou orientaci – viz poloha šipek v obr. 4a), což se díky SHE projeví oscilací polarity napětí podél polovodičového kanálu, která je následně detekována příslušnými elektrodami. Po přiložení napětí na hradlo umístěné nad vodivostní kanál – viz obr. 4b), pak dochází k ovlivnění vnitřních efektivních magnetických polí v tomto materiálu, což vede ke změně příslušné precesní periody orientace spinu, a tím i ke změně napětí detekovaného na jednotlivých elektrodách. Elektrický proud je odveden ze součástky ještě před dosažením hradla a měřících elektrod, což umožňuje detekci čistě spinového proudu (tj. případu, kdy počet elektronů s jednou orientací spinu šířících se podél kanálu je přesně roven počtu elektronů s opačnou orientací spinu šířících se opačným směrem). Při posunutí místa optické injekce elektronů do tranzistoru, jak je znázorněno v obr. 4b) šipkou s označením x, se změnilo místo počátku precese spinu

jev je tedy dobře pozorovatelný i za pokojové teploty [6].

Závěrem je možné konstatovat, že v současné době není vůbec jasné, kdy – a jestli vůbec – se tranzistory využívající spinu elektronu podaří realizovat v komerčně úspěšné součástce. Je totiž možné, že snaha o masové využití spinu v elektronice se nakonec ukáže být pouze slepou uličkou. Na druhou stranu je ale možné, že se díky porozumění fyzice spinu dočkáme skutečně revolučních změn ve výpočetní technice. To ale ukáže až čas.

LITERATURA

- [1] Moore, G. E.: *Cramming more components onto integrated circuits*. *Electronics* 38, č. 8, 19. 4. 1965.
- [2] Awschalom, D. D., Flatté, M. E., Samarth, N.: *Spintronika*, *Scientific American* (české vydání) 286, 52–59 (2002).
- [3] Datta, S. a Dass, B.: *Electronic analog of the electro-optic modulator*, *Appl. Phys. Lett.* 56, 665–667 (1990).
- [4] Koo, H. Ch., Kwon, J. H., Eom, J., Chang, J., Han, S. H., Johnson, M.: *Control of spin precession in a spin-injected field effect transistor*, *Science* 325, 1516–1518 (2009).
- [5] Sugahara, S., Tanaka, M.: *Spin MOSFETs as a basis for spintronics*, *ACM Transactions on Storage* 2, 197–219 (2006).
- [6] Wunderlich, J., Park, B. G., Irvine, A. C., Zarbo, L. P., Rozkotová, E., Němec, P., Novák, V., Sinova, J., Jungwirth, T.: *Spin hall effect transistor*, *Science* 330, 1801–1804 (2010).

Zdroj obr. 4: J. Wunderlich, Fyzikální ústav AV ČR a Hitachi Cambridge Laboratory.